

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4100574号
(P4100574)

(45) 発行日 平成20年6月11日(2008.6.11)

(24) 登録日 平成20年3月28日(2008.3.28)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 M 11/00 (2006.01) GO 1 M 11/00 U

請求項の数 6 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2005-348482 (P2005-348482)	(73) 特許権者	504137912
(22) 出願日	平成17年12月1日(2005.12.1)		国立大学法人 東京大学
(65) 公開番号	特開2007-155409 (P2007-155409A)		東京都文京区本郷七丁目3番1号
(43) 公開日	平成19年6月21日(2007.6.21)	(74) 代理人	100080089
審査請求日	平成19年8月8日(2007.8.8)		弁理士 牛木 護
		(74) 代理人	100119312
			弁理士 清水 栄松
		(74) 代理人	100119334
			弁理士 外山 邦昭
		(74) 代理人	100137800
			弁理士 吉田 正義
		(73) 特許権者	000006507
			横河電機株式会社
			東京都武蔵野市中町2丁目9番32号

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

周波数変調された発振光を出力する光源部と、
 前記光源部からの出力光を周波数シフトさせ、被測定光ファイバの一端からプローブ光として入射させるプローブ光生成手段と、
 前記光源部からの出力光を、前記被測定光ファイバの他端からポンプ光として入射させるポンプ光生成手段と、
 前記プローブ光とポンプ光の双方に変調を施す変調手段と、
 前記変調手段で施した2つの変調を利用して、前記被測定光ファイバから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離する検出手段と、
 前記検出手段で得た前記プローブ光の変化分のデータから、前記被測定光ファイバの特性を測定する測定手段と、を備えることを特徴とする光ファイバ特性測定装置。

【請求項2】

前記変調手段は、前記ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調部と、前記ポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施す第2の強度変調部とを備え、
 前記検出手段は、前記被測定光ファイバからの出射光を前記ポンプ光への強度変調周波数で同期検波する第1の同期検波部と、この第1の同期検波部からの出力を前記プローブ光への強度変調周波数で同期検波する第2の同期検波部とを備えたことを特徴とする請求項1記載の光ファイバ特性測定装置。

【請求項3】

10

20

前記変調手段は、前記ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調部と、前記ポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施す第2の強度変調部とを備え、

前記検出手段は、前記被測定光ファイバからの出射光を、前記ポンプ光への強度変調周波数と前記プローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波する同期検波部を備えたことを特徴とする請求項1記載の光ファイバ特性測定装置。

【請求項4】

周波数変調された発振光を周波数シフトさせ、被測定光ファイバの一端からプローブ光として入射し、

前記周波数変調された発振光を、前記被測定光ファイバの他端からポンプ光として入射し、

前記プローブ光とポンプ光の双方に変調を施し、

このプローブ光とポンプ光に施した2つの変調を利用して、前記被測定光ファイバから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離し、

前記プローブ光の変化分のデータから、前記被測定光ファイバの特性を測定することを特徴とする光ファイバ特性測定方法。

【請求項5】

前記ポンプ光に強度変調を施し、このポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施すことで、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調が施され、

前記被測定光ファイバからの出射光を前記ポンプ光への強度変調周波数で同期検波し、この同期検波による出力を、さらに前記プローブ光への強度変調周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離することを特徴とする請求項4記載の光ファイバ特性測定方法。

【請求項6】

前記ポンプ光に強度変調を施し、このポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施すことで、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調が施され、

前記被測定光ファイバからの出射光を、前記ポンプ光への強度変調周波数と前記プローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離することを特徴とする請求項4記載の光ファイバ特性測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法に関し、特に被測定対象としての光ファイバ内に生ずる誘導ブリルアン散乱現象を利用して、光ファイバに加わる歪みなどを分布的にセンシングする光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

光ファイバ中で生じるブリルアン散乱は、光ファイバに加わる歪みによって変化する。こうした現象を利用して、光ファイバの長さ方向に沿う歪みを分布的に測定する技術が構築されてきた。この測定技術は、ブリルアン散乱光の周波数変化を測定することで、歪みの大きさを測定できると共に、ブリルアン散乱光が戻ってくるまでの時間を測定することで、光ファイバの歪み箇所を特定することが可能なため、橋梁・橋脚、ビル、ダムなどの構造物や、航空機の翼・燃料タンクなどの材料に光ファイバを張り巡らせることで、これらの構造物や材料に加わる歪みの分布を知ることができる。そして、こうした歪みの分布から、構造物や材料の劣化や経年変化が分かり、防災や事故防止に役立てることができる。

【0003】

これまで知られていた歪み分布量の測定方法は、光パルスを入射し、後方に散乱されるブリルアン散乱光を時間分解で測定するものであった。しかし、このような

10

20

30

40

50

光パルスによる時間領域の測定方法では、測定時間（数分から10分掛かる）が長く、空間分解能（1 mが限界）に制限があることから、様々な構造物を動的に管理するような用途には不十分である。そのため、空間分解能が高く、より短時間に歪みなどが生ずる箇所を特定できるブレイクスルー技術がユーザーから求められていた。

【0004】

こうした要求に応えるべく、本願発明者らは特許文献1や特許文献2において、従来の光パルスの時間分解測定方法とは異なり、連続光の干渉状態を制御することによって、光ファイバの長さ方向に沿うブリルアン散乱の分布測定技術を提案し、特許も取得した。この技術は、BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis: ブリルアン散乱光
10 光関連領域解析) 法として知られており、1 cmの空間分解能と約60 Hzのサンプリング速度が達成され、注目されている。

【0005】

図8は、特許文献1に提案された光ファイバ特性測定装置の構成図である。同図において、101は所望の変調周波数で変調された光を出力する光源で、これは信号発生器102で発生した周期的信号により、半導体レーザ(LD) 103の注入電流を変調することで、当該半導体レーザ103から周波数変調または位相変調された光を発生する構成となっている。半導体レーザ103の出力光は、第1の光分岐器104で二分され、その一方の光が光周波数変換器105に入力される。光周波数変換器105は、マイクロ波発生器107で発生するマイクロ波を光強度変調器108に入力し、振幅変調を印加することで、入力光の中心周波数に対し
20 てマイクロ波周波数に等しい周波数差を有する側帯波を低周波側に発生させ、被測定光ファイバFUTの一端からプローブ光として入射する。また、第1の光分岐器104で分岐した他方の光は、光遅延器110および第2の光分岐器111を順に通過後、被測定光ファイバFUTの他端からプローブ光として入射する。なお、光遅延器110は、ポンプ光とプローブ光との間に所定の遅延時間を設定するためのものである。被測定光ファイバFUTからの出射光は、第2の光分岐器111で分岐され、光波長フィルタ112で低周波側の側帯波のみが選択され、光検出器113でそのパワーが測定される。

【0006】

ここで、ブリルアン散乱の原理について説明すると、一般的な光ファイバに光を入射した場合、光ファイバ材料の硝子分子が熱振動することにより発生する超音波のうち、波長が入射光波長の半分となる超音波が生じる。この超音波がもたらす硝子の周期的な屈折率
30 の変化は、入射光に対してブラッグ回折格子として作用し、光を後方に反射する。これがブリルアン散乱現象である。反射光は超音波の速度に依存してドップラーシフトを受けるが、この周波数シフト量は光ファイバに加わる伸縮歪みで変化するので、当該シフト量を測定すれば、歪みを検知することができる。

【0007】

より具体的には、被測定光ファイバFUT中に二つの周波数の異なる伝搬波、すなわち強いポンプ光と弱いプローブ光とを対向して伝搬させる。このとき、ポンプ光とプローブ光との間で特別な位相の適合状態が満足すると($f_{\text{pump}} = f_{\text{probe}} + \omega_B$: f_{pump} はポンプ光の中心周波数、 f_{probe} はプローブ光の中心周波数、 ω_B はブリルアン周波数である)、両波の相互作用によりポンプ光からプローブ光へ光子を散乱する音響フォノンが発生する。
40 これは、誘導ブリルアン散乱として、プローブ光の増幅をもたらす。但し、ポンプ光とプローブ光の周波数差が大きく揺らぐと、誘導は抑圧される。

【0008】

特許文献1などにも記述されているように、BOCDA法の基本的な原理は、対向して伝搬するポンプ光とプローブ光に対して同じ周波数変調を与えることにより、被測定光ファイバFUTに沿って、位置に依存した強い誘導ブリルアン散乱を発生させることにある。そのためBOCDA法では、光源101からの光を連続発振光とし、その発振周波数を信号発生器102により正弦波状の繰り返し波形により変化させつつ、プローブ光の中心周波数 f_{probe} とポンプ光の中心周波数 f_{pump} との差が、ブリルアン周波数 ω_B の近傍になるように、光周波数変換器105がプローブ光の中心周波数 f_{probe} を変化させる。これにより、ポンプ光と
50

プローブ光の位相が非同期であり、両光の相関が低い殆どの位置では、誘導が抑圧されるが、ポンプ光とプローブ光の位相が同期し、両光の相関が高い特別なcm程度の狭い領域（相関位置）では、誘導ブリルアン散乱が発生する。そして、この相関位置を移動させることにより、ブリルアン散乱による歪みの分布測定が可能になる。

【 0 0 0 9 】

図 8 に示す装置では、光源101から周波数変調されたレーザ光が第 1 の光分岐器104で分岐され、一方のレーザ光は光周波数変換器105へ入射し、変調（強度変調）されて光周波数が可変可能なプローブ光として被測定光ファイバFUTの一端に入射する。一方、第 1 の光分岐器104で分岐された他方のレーザ光は、光遅延器110で所定の時間遅延を受けた後、第 2 の光分岐器111を介して、ポンプ光として被測定光ファイバFUTの他端に入射する。

10

【 0 0 1 0 】

ここで、プローブ光とポンプ光は、それぞれ同一の光源101にて周波数変調された光であるため、被測定光ファイバFUTに入射したプローブ光とポンプ光は、被測定光ファイバFUTに沿って周期的な相関ピークを示す。この相関ピークを示した位置では、プローブ光とポンプ光との光周波数差は一定しているため、誘導ブリルアン散乱現象によって光強度が増幅される。一方、それ以外の殆どの位置では、プローブ光とポンプ光との光周波数はたえず変動しているため、プローブ光はブリルアン増幅の効果を受けず光強度はほぼ変化しない。従って、プローブ光がブリルアン増幅により得る利得の大部分は、この相関ピークを示した位置で生じるものとなる。

【 0 0 1 1 】

20

ブリルアン増幅から利得を得たプローブ光は、被測定光ファイバFUTの他端から出射され、その後、第 2 の光分岐器111を通過して光波長フィルタ112へ入射する。ここで光波長フィルタ112は、プローブ光から低周波側の側帯波の光のみを選択し、光検出器113にてその強度を検出する。

【 0 0 1 2 】

図 9 は、図 8 中の被測定光ファイバFUT内における相関ピークを模式的に示した図である。同図において、 f_m は半導体レーザ103に印加する周波数変調周波数を表し、 d_m は隣接する相関ピークの間隔である。被測定光ファイバFUT中のある 1 点で生じる誘導ブリルアン散乱を選択的に測定するためには、同図で示したように、光アイソレータによりポンプ光とプローブ光が対向伝搬する領域を限定し、この中に唯一の相関ピークが存在するようにする。なお、ここでは、半導体レーザ103からのレーザ光を周波数変調する場合を例に挙げて説明するが、半導体レーザ103からのレーザ光を信号発生回路102で位相変調する場合には、 f_m を位相変調の変調周波数と読み替えれば良い。すなわち、ここでいう周波数変調とは位相変調の技術も含む。図 9 に示すように、被測定光ファイバFUTに入射したプローブ光とポンプ光とが相関ピークを示す位置では誘導ブリルアン散乱が強く生じる。図中の符号120～122に示した波形のピークは相関ピークを示しており、120は 0 次の相関ピーク、121は 1 次の相関ピーク、122は 2 次の相関ピークである。なお、0 次の相関ピークの位置はプローブ光とポンプ光との光路差が零となる位置である。

30

【 0 0 1 3 】

ここで、相関ピークの間隔 d_m は、光源101の周波数変調周波数を f_m とし、被測定光ファイバFUT内の光速度を V_g とすると、次の式で表される。

40

【 0 0 1 4 】

【 数 1 】

$$d_m = \frac{V_g}{2f_m}$$

【 0 0 1 5 】

上記数 1 によれば、相関ピークの間隔 d_m は半導体レーザ103に与える周波数変調周波

50

数 f_m により決定されることが分かる。

【 0 0 1 6 】

図 1 0 は、周波数変調周波数 f_m を変化させたときの相関ピークの位置が変化の様子を示す図である。同図に示すように、周波数変調周波数 f_m を変化させると、相関ピークの間隔 d_m が変化し、相関ピークの位置が変化する。このようにして、相関ピーク位置、すなわち測定位置を変化させて分布計測が実現される。光アイソレータで挟まれた領域には、1つの相関ピークのみが存在するようにする必要から、分布計測の測定範囲は d_m となる。ただし、周波数変調周波数 f_m のみを変化させても 0 次の相関ピーク 120 の位置は変化しない。また、図 1 0 中の z は、相関ピーク幅であり、分布計測の空間分解能である。

10

【 0 0 1 7 】

前述のように、0 次の相関ピーク 120 の位置はプローブ光とポンプ光との光路差が零となる位置である。図 1 1 は、0 次の相関ピーク 120 の位置を可変させる様子を示す図である。光遅延器 110 による遅延時間を可変させると、図 1 1 に示すように、0 次の相関ピーク 120 の位置が変化する。ここで、0 次の相関ピーク 120 の位置は周波数変調周波数 f_m には依存しない。従って、光遅延器 110 による遅延時間を可変させることにより、0 次の相関ピーク 120 のみならず、1 次の相関ピーク 121、2 次の相関ピーク 122 等も、相関ピークの間隔 d_m を変化させずに移動させることができる。この場合も、分布計測の測定範囲は d_m となる。

【 0 0 1 8 】

20

但し、相関ピークの位置を移動させる距離よりも相関ピーク 120 ~ 122 の空間分解能 z が大きくなると意味をなさない。ここで、被測定光ファイバ FUT のブリルアンゲイン線幅を ν_B 、光源 101 の周波数変調周波数を f_m 、光源 101 の周波数変調の振幅を Δf 、被測定光ファイバ FUT 内の光速度を V_g とすると、空間分解能 z は次式により与えられる。

【 0 0 1 9 】

【数 2】

$$\Delta z = \frac{V_g \cdot \Delta \nu_B}{2\pi f_m \cdot \Delta f}$$

30

【 0 0 2 0 】

従って、この数 2 から、例えば光源 101 の周波数変調周波数 f_m を調整しつつ、空間分解能 z は移動距離に対して十分に小さくなるよう調整する必要がある。

【 0 0 2 1 】

さらに、分布計測の測定範囲 d_m 中の相関ピークに対応した有効な感知ポイントの数 N は、装置としての評価パラメータと見なすことができる。この、感知ポイントの数 N は、相関ピークの間隔 d_m と空間分解能 z との比で与えられ、次式により与えられる。

【 0 0 2 2 】

【数 3】

40

$$N \equiv \frac{d_m}{\Delta z} = \frac{\pi \cdot \Delta f}{\Delta \nu_B}$$

【 0 0 2 3 】

図 8 に示す装置では、光源 101 の施す光周波数変調によって、被測定光ファイバ FUT の殆どの位置で誘導ブリルアン散乱が抑制されるが、特別な相関位置では、ポンプ光とプローブ光との相対的な周波数差が一定となって、誘導ブリルアン散乱が起こる。また、この誘導ブリルアン散乱が生じる相関位置は、プローブ光およびポンプ光への周波数変調が周期

50

的であることから、被測定ファイバFUTに沿って周期的に現れる。そのため、被測定光ファイバFUTの特性を測定するためには、被測定ファイバFUT内に相関ピークが位置的に1つだけ存在するように、上記のように光アイソレータを挿入したり、光遅延器110の遅延量や半導体レーザ103に印加する周波数変調周波数 f_m を調整しなければならない。

【0024】

上記数1に示すように、相関ピークの間隔 d_m は光源101の周波数変調速さ（変調周波数 f_m ）に反比例する。従って、光源101の変調周波数 f_m を下げて、その周波数変化を緩やかにすれば、相関ピークの間隔 d_m については測定範囲を広げることができる。しかし、相関ピークの間隔 d_m を広げると、相関部分の幅も広がってしまい、数3の式に示すように、同じ感知ポイントの数 N では、空間分解能 z が劣化して大きな値となってしまう。そのため、空間分解能 z を高く維持したまま、装置としての測定範囲を広げるには、光源101の周波数変調の振幅（変調振幅） f を増やし、実質的な感知ポイントの数 N を増やす必要がある。

10

【0025】

この点について、図8に示す装置は、周波数が約10GHz異なるプローブ光の増加分（信号）とポンプ光の反射分（雑音）とを、光検出器113の前段に設けた光波長フィルタ112によって分離している。しかし、このような構成では、空間分解能 z を高く維持したまま測定範囲を拡大させるために、光源101の周波数変調の振幅 f を無制限に広げることにはできない。その理由は、当該振幅 f が、被測定光ファイバFUTのブリルアン周波数 ω_B の半分である約5GHzを越えると、ポンプ光とプローブ光のスペクトルが重なり合い始めて、光波長フィルタ112によって両光を分離することが不可能になるからである。そのため、空間分解能 z を数cmのオーダーにするためには、光源101からの出力光を10MHz程度の速さとせざるを得ず、被測定光ファイバFUTの長さである測定範囲が10m程度に制限されていた。

20

【0026】

このような問題を解決する方法として、別の特許文献2では、図12に示すような装置を提案している。この装置は、前記図8の光遅延器110に代わり、例えばE0スイッチなどのパルス変調器131が配設されると共に、第2の光分岐器111と光波長フィルタ112との間にタイミング調整器132が配設される。パルス変調器131は、第1の光分岐器104で分岐された他方の光を、パルス状のポンプ光に変調して出力する。また、タイミング調整器132は、ポンプ光のパルスタイミングに合わせてゲートオンし、被測定光ファイバFUTに沿って繰り返し現れる相関ピークの中から、一つの相関ピークを選択するものである。

30

【0027】

ここでは、被測定光ファイバFUTの一端から連続光のプローブ光を入射させ、他端からパルス状のポンプ光を入射させている。そのため、図13に示すように、被測定光ファイバFUT中では、ポンプ光（図中のL2を参照）が被測定光ファイバ中を伝搬するに伴って、被測定光ファイバ中の異なる位置で時系列的に相関ピーク $P_0 \sim P_N$ （ N は正の整数）を通過する。図13は、ポンプ光パルスの進行に伴って、被測定光ファイバFUT中で時系列的に相関ピークを通過する様子を示している。

【0028】

よって、ポンプ光が被測定光ファイバFUT中に設定した測定点付近を通過する時刻と、測定点付近からの光がタイミング調整器132に至るまでの時間を考慮すれば、測定点付近からの光のみを測定できる。このように、タイミング調整器132は、パルス変調器131がレーザ光をパルス化するタイミングと、パルス変調器131から射出されたポンプ光が第2の光分岐器111を介して被測定光ファイバFUTの他端に入射されるまでの時間と、被測定光ファイバFUTの他端から測定点付近に至るまでの時間と、測定点付近からの光が被測定光ファイバFUTの他端に至るまでの時間及び被測定光ファイバFUTの他端から第2の光分岐器111を介してタイミング調整器132に至るまでの時間とを考慮して、その動作タイミングが調整される。

40

【特許文献1】特許第3667132号公報

50

【特許文献2】特許第3607930号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0029】

図12における装置では、パルス変調器131により光源101からのレーザ光を10m程度の長さのパルスとして切出し、このパルス状のポンプ光にタイミングを合せて、タイミング調整器132でゲートをかけることで、被測定光ファイバFUT中の特定な位置にある一つの相関ピークを選択するようにしている、しかし、この方法で例えば300mの測定範囲を得るためには、30対1の狭い光パルスを生成する必要があるため、光エネルギーの利用効率が下がり、信号精度も劣化する。また測定時間が長くなるという問題もある。

10

【0030】

またBOCDA法では、誘導ブリルアン現象によるプローブ光の僅かな増加を感度よく検出するために、図8の装置において、ポンプ光に対し強度変調を与え、この変調した周波数で被測定光ファイバFUTからの増加したプローブ光を、ロックイン増幅器で同期検波する手法も知られている。しかし、ポンプ光の一部は、被測定光ファイバFUTの経路中で反射や後方散乱を受けて光検出器113側に戻り、この戻り光も同期検波周波数で変調されているので、ロックイン増幅器から雑音として出力されてしまう。そのため、光検出器113の前段に光波長フィルタ112を設けて、プローブ光のみを選択する構造を採らざるを得なくなり、空間分解能 Δz を高く維持したまま測定範囲を拡大させるために、光源101の周波数変調の振幅 Δf を上げようとする、その振幅 Δf が5GHzを越える段階で、どのような光波長フィルタ112であっても両光を分離することが不可能になる。この結果、雑音が増大し、或いは空間分解能や測定範囲が制限される問題を払拭できなかった。

20

【0031】

本発明は上記問題点に鑑み、プローブ光の増加分を雑音と完全に区別して、空間分解能を高く保ったまま、測定範囲を伸ばすことができる新規な光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法を提供することをその目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0032】

上記目的を達成するために、本発明では、ポンプ光だけでなくプローブ光にも変調を施し、この2つの変調を利用して、前記被測定光ファイバから出射される光の中から、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の変化分だけを取り出そうとするものである。

30

【0033】

すなわち、請求項1における光ファイバ特性測定装置は、周波数変調された発振光を出力する光源部と、前記光源部からの出力光を周波数シフトさせ、被測定光ファイバの一端からプローブ光として入射させるプローブ光生成手段と、前記光源部からの出力光を、前記被測定光ファイバの他端からポンプ光として入射させるポンプ光生成手段と、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調を施す変調手段と、前記変調手段で施した2つの変調を利用して、前記被測定光ファイバから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離する検出手段と、前記検出手段で得た前記プローブ光の変化分のデータから、前記被測定光ファイバの特性を測定する測定手段と、を備えて構成される。

40

【0034】

この場合、前記変調手段は、前記ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調部と、前記ポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施す第2の強度変調部とを備え、前記検出手段は、前記被測定光ファイバからの出射光を前記ポンプ光への強度変調周波数で同期検波する第1の同期検波部と、この第1の同期検波部からの出力を前記プローブ光への強度変調周波数で同期検波する第2の同期検波部とを備えていることが好ましい。

【0035】

また、別な装置の構成として、前記変調手段は、前記ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調部と、前記ポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施す第2の

50

強度変調部とを備え、前記検出手段は、前記被測定光ファイバからの出射光を、前記ポンプ光への強度変調周波数と前記プローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波する同期検波部を備えていることが好ましい。

【0036】

請求項4における光ファイバ特性測定方法は、周波数変調された発振光を周波数シフトさせ、被測定光ファイバの一端からプローブ光として入射し、前記周波数変調された発振光を、前記被測定光ファイバの他端からポンプ光として入射し、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調を施し、このプローブ光とポンプ光に施した2つの変調を利用して、前記被測定光ファイバから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離し、前記プローブ光の変化分のデータから、前記被測定光ファイバの特性を測定する方法である。

10

【0037】

この場合、前記ポンプ光に強度変調を施し、このポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施すことで、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調が施され、前記被測定光ファイバからの出射光を前記ポンプ光への強度変調周波数で同期検波し、この同期検波による出力を、さらに前記プローブ光への強度変調周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離するのが好ましい。

【0038】

また、別な方法として、前記ポンプ光に強度変調を施し、このポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施すことで、前記プローブ光とポンプ光の双方に変調が施され、前記被測定光ファイバからの出射光を、前記ポンプ光への強度変調周波数と前記プローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱による前記プローブ光の変化分だけを分離するのが好ましい。

20

【発明の効果】

【0039】

本発明の請求項1における光ファイバ特性測定装置、および請求項4における光ファイバ特性測定方法によれば、プローブ光とポンプ光の双方に両光を識別するための変調を施すことで、プローブ光とポンプ光の周波数差を利用するのではなく、この変調を利用して、被測定光ファイバの特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを分離できる。そのため、従来のような光学フィルタを不要にできる。しかも、空間分解能を高く維持したまま測定範囲を拡大させるために、光源の周波数変調の振幅をある程度広げた場合でも、プローブ光の変化分を検出する際にこの振幅の影響を受けることが無い。よって、プローブ光の増加分を雑音と完全に区別して、空間分解能を高く保ったまま、測定範囲を伸ばすことができる。

30

【0040】

本発明の請求項2における光ファイバ特性測定装置、および請求項5における光ファイバ特性測定方法によれば、ポンプ光とプローブ光のそれぞれに異なる周波数で強度変調が施されているので、被測定光ファイバからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数で二重に同期検波すれば、被測定光ファイバの特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを効果的に分離できる。

40

【0041】

本発明の請求項3における光ファイバ特性測定装置、および請求項6における光ファイバ特性測定方法によれば、ポンプ光とプローブ光のそれぞれに異なる周波数で強度変調が施されているので、被測定光ファイバからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波すれば、被測定光ファイバの特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを効果的に分離できる。さらに、2つの変調周波数の差周波数で1度の同期検波を行なうので、同期検波の周波数を高く設定することができ、測定速度を高く維持できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0042】

50

以下、本発明における好ましい光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法を、図面を参照しながら詳細に説明する。

【0043】

図1は、本発明の第1実施形態による光ファイバ特性測定装置を示している。同図において、1は光源であり、これは信号発生器2と半導体レーザ3とにより構成される。半導体レーザ3は、例えば小型でスペクトル幅の狭いレーザ光を出射する分布帰還型レーザダイオード(DFB LD)が用いられる。信号発生器2は、半導体レーザ3から出射されるレーザ連続光を正弦波状に周波数変調または位相変調するために、所望の変調信号を当該半導体レーザ3に注入電流として出力するものである。

【0044】

4は、半導体レーザ3からの出射光を例えば強度比90/10に二分する第1の光分岐器で、分岐された一方のレーザ光は、第2の基準信号発生器5を有する第2の光強度変調器6により強度変調された後、第2のエルビウム添加光ファイバ増幅器(以下、EDFAという)7により増幅される。さらに、第2のEDFA7で増幅した強度変調光は、単一側帯波(以下、SSBという)変調器8によって約10GHz周波数が下げられ、プローブ光として被測定光ファイバFUTの一端に入射する。

【0045】

前記SSB変調器8は、2つの一次側帯波の中で高域の周波数成分を抑制すると共に、ポンプ光から安定した周波数差を維持できるように、マイクロ波と正確なDCバイアス制御を利用しており、入力光に対しマイクロ波周波数に等しい周波数差を有する低周波側の側帯波を、プローブ光として出力するようになっている。さらに、SSB変調器8の後段には、偏光ダイバーシティ法を適用するための偏光スイッチ(PSW)9が挿入される。偏光スイッチ9は、ブリルアンゲインの偏光に依存した振れを抑制するために設けられている。

【0046】

一方、前記第1の光分岐器4で分岐された他方のレーザ光は、所定の長さの光ファイバからなる光遅延器11を通過し、別な第1の基準信号発生器12を有する第1の光強度変調器13により強度変調された後、第1のEDFA14により増幅される。そして、この第1のEDFA14で増幅した強度変調光は、第2の光分岐器15を通過後、被測定光ファイバFUTの他端からポンプ光として入射し、被測定光ファイバFUT内でプローブ光とポンプ光が向かい合って伝搬するようになっている。なお、光遅延器11は前述のように、ポンプ光とプローブ光との間に所定の遅延時間を設定するためのもので、光ファイバ長を変えることで、遅延時間を適宜調整することができる。

【0047】

前記被測定光ファイバFUTの他端からの出射光は、第2の光分岐器15を介して光検出器20に取り込まれ、そのパワーが測定される。光検出器20からの検出出力は、直列接続された第1のロックイン増幅器21と第2のロックイン増幅器22を通ることにより、ポンプ光の変調周波数とプローブ光の変調周波数でそれぞれ同期検波され、誘導ブリルアン現象に伴うプローブ光の増加分だけが、例えばパーソナルコンピュータで構成される測定手段としてのデータ処理器23に、最終的なデータとして所定のサンプリング率で取り込まれる。

【0048】

なお、第1の光強度変調器13や第2の光強度変調器6は、例えば電気光学変調器で構成される。また、第1の光分岐器4や第2の光分岐器15は、サーキュレータ、ビームスプリッタ、ハーフミラーなどを用いてもよい。さらに他の変形例として、光源1はプローブ光とポンプ光のそれぞれに独立して別なものが設けられていてもよい。

【0049】

そして本実施形態では、第2の光強度変調器6、第2のEDFA7、SSB変調器8、偏光スイッチ9が、光源1の出力光からプローブ光を生成するプローブ光生成手段31を構成し、光遅延器11、第1の光強度変調器13、第1のEDFA14、第2の光分岐器15が、光源1の出力光からポンプ光を生成するポンプ光生成手段32を構成し、光検出器20、第1のロックイン

10

20

30

40

50

増幅器21, 第2のロックイン増幅器22が、被測定光ファイバFUTから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加分だけを分離する検出手段33を構成している。

【0050】

前述したように、図1に示す装置も、BOCDA法の基本的な原理に従い、光源1からの光を連続発振光とし、その発振周波数を信号発生器2により正弦波状の繰り返し波形により変化させつつ、プローブ光の中心周波数 f_{probe} とポンプ光の中心周波数 f_{pump} との差が、ブリルアン周波数 f_B の近傍になるように、SSB変調器8がプローブ光の中心周波数 f_{probe} を変化させている。これにより、ポンプ光とプローブ光の位相が非同期であり、両光の相関が低い殆どの位置では、誘導が抑圧されるが、ポンプ光とプローブ光の位相が同期する相関位置では、誘導ブリルアン散乱が発生する。そして、この相関位置を移動させることにより、ブリルアン散乱による歪みの分布測定が可能になる。

10

【0051】

誘導ブリルアン散乱による相関位置は、プローブ光およびポンプ光への変調が周期的であることから、アイソレータ16とサーキュレータ(第2の光分岐器)15で挟まれた被測定ファイバFUTに沿って周期的に現れる。そのため、被測定ファイバFUT内に相関ピークが位置的に1つだけ存在するように、光遅延器11の遅延量や半導体レーザ3に印加する周波数変調周波数 f_m を調整する。さらに、装置としての空間分解能 Δz を高く維持したまま、その測定範囲を広げるために、半導体レーザ3に対する周波数変調の振幅(変調振幅) f を増やす必要がある。

20

【0052】

本実施形態では、受光器である光検出器20の前段に、ポンプ光とプローブ光とを分離するための光波長フィルタを用いず、代わりにポンプ光とは異なる周波数で、プローブ光にも第1の光強度変調器13により強度変調を施して、ポンプ光の変調周波数とプローブ光の変調周波数の両方で同期検波を行なう点が注目される。このように、プローブ光の増加分のみを検出する際に、プローブ光とポンプ光の変調周波数に依存して、2つの同期検波手段(すなわち、ロックイン増幅器21, 22)を用いる手法を、ここでは特に「ダブルロックイン」法と名付ける。一方、ポンプ光だけを強度変調して、その変調周波数で同期検波を行ない、受光器の前段に光波長フィルタを設けた既存の方法を、「シングルロックイン」法と呼ぶ。

30

【0053】

次に、図2を参照して、上記図1の構成に基づくダブルロックイン法の動作を、従来のシングルロックイン法と比較しながら説明する。なお、図2の(a)は、シングルロックイン法によるプローブ光とポンプ光の測定推移を示し、また図2の(b)は、ダブルロックイン法によるプローブ光とポンプ光の測定推移を示している。

【0054】

図1に示す装置では、信号発生器2によって半導体レーザ3から周波数変調又は位相変調されたレーザ光が出射すると、この出射光が第1の光分岐器4で所定の強度比に分岐される。第1の光分岐器4からの一方のレーザ光は、第2の光強度変調器6に入力され、ここで第2の基準信号発生器5から発生する基準信号の周波数に基づき強度変調される。この強度変調によりチョッピングされたレーザ光は、続く第2のEDFA7によって増幅され、SSB変調器8に入力される。SSB変調器8は、チョッピングされたレーザ光をSSB変調して、当該レーザ光の中心周波数に対してブリルアン周波数 f_B に近い周波数差の側帯波を発生し、この側帯波が偏光スイッチ9とアイソレータ16を通過して、被測定光ファイバFUTの一端にプローブ光として入射される。

40

【0055】

一方、第1の光分岐器4から分岐した他方のレーザ光は、光遅延器11を通過して所定の遅延時間を与えられた後、第1の光強度変調器13に入力され、ここで第1の基準信号発生器12から発生する基準信号の周波数に基づき強度変調される。なお、第1の基準信号発生器12と第2の基準信号発生器5による各基準信号の周波数は各々異なる。この強度変調に

50

よりチョッピングされたレーザ光は、続く第1のEDFA14によって増幅され、第2の光分岐器15を経て、被測定光ファイバFUTの他端にポンプ光として入射される。

【0056】

上述したように、被測定光ファイバFUT中を伝搬するプローブ光とポンプ光は、それぞれ第2の光強度変調器6と第1の光強度変調器13によって、異なる周波数でチョッピングされる(図2(b)の(1)を参照)。これに対して、従来のシングルロックイン法では、プローブ光が連続光のままである(図2(a)の(1)を参照)。このような両光を被測定光ファイバFUT中で対向して伝搬させると、図1における装置では、図2(b)の(2)に示すように、反射や後方散乱を受けたポンプ光の一部が、被測定光ファイバFUTから出射されると共に、チョッピングされたプローブ光に重畳して、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加分が、ポンプ光の強度変調周波数によりチョッピングされた状態で、被測定光ファイバFUTから出射される。一方、従来のシングルロックイン法では、図2(b)の(1)に示すように、ポンプ光の一部の波形はダブルロックイン法によるものと同じであるが、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加分は、連続したプローブ光に重畳して発生する。

10

【0057】

再度図1に示す装置で、被測定光ファイバFUTからの出射光を光検出器20で検出し、第1のロックイン増幅器21によりポンプ光の強度変調周波数で同期検波すると、図2(b)の(3)に示すように、同じ強度変調周波数成分を含む前記ポンプ光の一部とプローブ光の増加分だけが取り出されて増幅出力され、それ以外の周波数成分は除去される。第1のロックイン増幅器21で検波されたポンプ光の一部は、プローブ光の強度変調周波数の影響を受けていないが、同じく第1のロックイン増幅器21で検波された誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加分は、元のプローブ光の強度変調周波数に同期している。そのため、後段の第2のロックイン増幅器22によりプローブ光の強度変調周波数で同期検波すると、プローブ光の増加分だけが取り出されて増幅出力され、それ以外のポンプ光の一部を含む他の雑音成分がここで完全に除去される(図2(b)の(4)を参照)。

20

【0058】

つまり、図1に示す装置では、元のプローブ光にもポンプ光とは異なる周波数で強度変調が施されているので、第1のロックイン増幅器21でポンプ光の一部とプローブ光の増加分を同期検波した後も、歪み測定に必要なプローブ光の増加分だけが、元のプローブ光の強度変調周波数に同期している。このことを利用すれば、光波長フィルタを用いることなく、第2のロックイン増幅器22によって、プローブ光の増加分を他の成分から完全に分離することができる。しかも、装置として空間分解能 z を高く維持したまま測定範囲を拡大させることを目的として、光源1の周波数変調の振幅 f をある程度広げた場合でも、ポンプ光とプローブ光の周波数差 Δf を利用して、プローブ光の増加分を検出してはいないので、この振幅 f の影響を受けることなく、必要なプローブ光の増加分だけを正しく検出することができる。

30

【0059】

一方、従来のシングルロックイン法では、被測定光ファイバFUTからの出射光中のポンプ光の一部とプローブ光の増加分は、何れもポンプ光の強度変調した周波数の影響を受けており、これらの光は同期検波によって分離することができない。そのため、あらかじめポンプ光とプローブ光の周波数差 Δf を利用して、光学フィルタ(光波長フィルタ112)を用いざるを得なくなり(図2(a)の(3)を参照)、狭い範囲の分布測定では、図2(a)の(4)に示すように、プローブ光の増加分だけを取り出すことができるが、空間分解能 z を高く維持したまま測定範囲を拡大させるために、光源の周波数変調の振幅 f を広げようとする、雑音成分を除去できなくなる。

40

【0060】

次に、図1における装置の実験例とその結果について説明する。この実験例では、光源1の半導体レーザ3として1552nmの分布帰還型レーザダイオード(DFB LD)を利用し、試験用の被測定光ファイバFUT内で相関ピークを発生させるために、信号発生器2による

50

正弦波周波数変調が与えられた。半導体レーザ 3 からの出力は、ブリルアンポンプ光として直接利用され、相関ピークの次数を制御するために、光遅延器 11 としての 3 km の遅延用ファイバを通過した後で、第 1 の EDFA14 により増幅される。一方、プローブ光は SSB 変調器 8 を通して生成される。この SSB 変調器 8 における低域の周波数成分に対する高域の周波数成分の抑制比は、25 dB 以上であった。強度変調がポンプ光とプローブ光の両方に与えられ、ポンプ光用のチョッピング周波数は 4.8 MHz、プローブ光用のチョッピング周波数は 8.2 kHz とした。帯域が 125 MHz のフォトダイオードが光検出器 20 として利用され、最終的なデータが、直列接続された 2 つのロックイン増幅器 21, 22 の後に、500 pt / s のサンプリング率で取り込まれた。

【 0 0 6 1 】

半導体レーザ 3 の周波数変調周波数 f_m は、被測定光ファイバ FUT の相関ピーク位置に依存して 310 ~ 320 kHz としており、これは前記数 1 によれば、320 m 以上の相関ピークの間隔すなわち測定範囲 d_m に対応する。周波数変調の振幅 f は、一般的なファイバのブリルアン周波数 f_B (~ 10.8 GHz) よりも大きい 15.5 GHz であり、また数 2 から、測定の空間分解能 Δz は約 20 cm と計算される。ここでの有効な感知ポイントの数 N は、約 1500 である。

【 0 0 6 2 】

被測定光ファイバ FUT は、図 3 (a) に示すように、連続した一般的なファイバ (SMF : 単一モード光ファイバ) と、30 cm の長さを有する 3 つの分散シフト光ファイバ (DSF) からなり、その全体長は約 305 m である。

【 0 0 6 3 】

ブリルアンゲインスペクトル BGS の測定は、10.2 GHz から 11.2 GHz にわたり周波数差 ν を掃引しながら、被測定光ファイバ FUT に沿って 10 cm 毎に行なわれた。また、1 箇所に対する測定スピードは、偏波ダイバーシティの手順を含めて 0.5 Hz であった。分散シフト光ファイバ DSF 部の周辺で測定されたブリルアンピーク周波数と位置との特性を、図 3 (b) に示す。被測定光ファイバ FUT における 30 cm の分散シフト光ファイバ DSF 部で、10.5 GHz 前後の明確に異なるブリルアンピーク周波数が観測され、300 m 以上の測定範囲を確認した。各点の測定誤差は ± 3 MHz で、これは $\pm 60 \mu$ の歪みに対応する。

【 0 0 6 4 】

比較のために、従来知られているシングルロックイン法でも同様の測定を行ない、単一モード光ファイバ SMF 部および分散シフト光ファイバ DSF 部の同一位置で、従来例と本実施例におけるブリルアンゲインスペクトル BGS の形状を、図 4 (a) の上段と下段にそれぞれ示す。シングルロックイン法の場合には、多量のノイズが大きなバックグラウンド直流成分として観測されるが、これはポンプ光の後方反射によるものと考えられる。一方、ダブルロックイン法による測定では、両方の部分でブリルアンゲインスペクトル BGS がより明確に見えており、しかも直流レベルが抑制されている。図 4 (b) は、シングルロックイン法による検波 (図中の円を参照) とダブルロックイン法による検波 (図中の線を参照) の両方で、一つの分散シフト光ファイバ DSF 部周辺におけるブリルアンピーク周波数のプロットを示している。シングルロックイン法の場合には、ピーク周波数の大きな振れがノイズにより生じている。これらの結果により、ダブルロックイン法の有効性が、長い測定範囲で確認された。

【 0 0 6 5 】

さらに、図 1 で用いられている SSB 変調器 8 の効果を確認するために、当該 SSB 変調器 8 に代わり一般的な電気光学変調器 (EOM) を利用して同一の測定を行ない、それらの結果を比較した。測定されたブリルアンゲインスペクトル BGS のグラフは図 5 に示されており、一般的な電気光学変調器 EOM を利用した場合には、図 5 (a) におけるシングルロックイン法と、図 5 (b) に示すダブルロックイン法のいずれにおいても、ブリルアンゲインスペクトル BGS が観測されなかった。すなわち、どちらの方法でも、電気光学変調器 EOM を利用した場合には、ブリルアンゲインスペクトル BGS が失われている。

【 0 0 6 6 】

10

20

30

40

50

こうした特徴の根本的な理由は、電気光学変調器EOMからの2つの側波帯によって、ブリルアンゲインとロス（損失）が相殺されることにあると考えられる。この実験結果は、光学フィルタを利用しない場合に、SSB変調器8の利用が大きな変調振幅（ $f > \omega_B$ ）に対して不可欠であることを、明確に示している。

【0067】

このように、第1の実施形態における光ファイバ特性測定装置は、周波数変調された発振光を出力する光源部としての光源1と、光源1からの出力光の一部を周波数シフト手段であるSSB変調器8で周波数シフトさせ、被測定光ファイバFUTの一端からプローブ光として入射させるプローブ光生成手段31と、光源1からの出力光の一部の残りを、被測定光ファイバFUTの他端からポンプ光として入射させるポンプ光生成手段32と、プローブ光とポンプ光の双方に変調を施す変調手段としての第2の光強度変調器6および第1の光強度変調器13と、前記変調手段で施した2つの変調を利用して、被測定光ファイバFUTから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加すなわち変化分だけを分離する検出手段33と、この検出手段33で得たプローブ光の変化分のデータから、被測定光ファイバFUTの特性を測定する測定手段としてのデータ処理器23と、を備えている。

【0068】

これに対応して、第1の実施形態における光ファイバ特性測定方法は、光源部である光源1からの周波数変調された発振光を例えばSSB変調器8などで周波数シフトさせ、被測定光ファイバFUTの一端からプローブ光として入射する一方で、同様に周波数変調された発振光を、被測定光ファイバFUTの他端からポンプ光として入射したものであるにおいて、プローブ光とポンプ光の双方に変調を施し、このプローブ光とポンプ光に施した2つの変調を利用して、被測定光ファイバFUTから出射される光の中で、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の変化分だけを分離し、この分離したプローブ光の変化分のデータから、被測定光ファイバFUTの特性を測定するようにしている。

【0069】

なお、ここでいう光源部とは、図1に示すように単独の光源1からプローブ光とポンプ光とを生成するものだけでなく、プローブ光とポンプ光のそれぞれに光源を設けたものなども含む。

【0070】

上記装置や方法では、プローブ光とポンプ光の双方に両光を識別するための変調を施すことで、プローブ光とポンプ光の周波数差を利用するのではなく、この変調を利用して、被測定光ファイバの特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを分離することができる。そのため、従来のような光波長フィルタ112を不要にできる。しかも、空間分解能 Δz を高く維持したまま測定範囲を拡大させるために、光源1の周波数変調の振幅 f をある程度広げた場合でも、プローブ光の変化分を検出する際にこの振幅 f の影響を受けることが無い。よって、プローブ光の増加分を雑音と完全に区別して、空間分解能 Δz を高く保ったまま、測定範囲を伸ばすことができる。さらに、前記特許文献2で指摘したような、光エネルギーの利用効率低下に伴う信号精度の劣化や、測定時間が長くなる懸念も一掃できる。

【0071】

また、本実施形態における光ファイバ特性測定装置は、前記変調手段として、ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調器13と、ポンプ光とは異なる周波数でプローブ光に強度変調を施す第2の強度変調器6とを備えていると共に、検出手段33として、被測定光ファイバFUTからの出射光をポンプ光への強度変調周波数で同期検波する第1のロックイン増幅器21と、この第1のロックイン増幅器21からの出力をプローブ光への強度変調周波数で同期検波する第2のロックイン増幅器22とを備えている。

【0072】

これに対応して、本実施形態における光ファイバ特性測定方法は、プローブ光とポンプ光の双方に変調を施すために、ポンプ光に強度変調を施す一方で、このポンプ光とは異なる周波数で前記プローブ光に強度変調を施し、被測定光ファイバFUTからの出射光をポン

10

20

30

40

50

プローブ光への強度変調周波数で同期検波し、この同期検波による出力を、さらにプローブ光への強度変調周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の変化分だけを分離するようにしている。

【0073】

このような装置若しくは方法を採用することにより、ポンプ光とプローブ光のそれぞれに異なる周波数で強度変調が施されているので、被測定光ファイバFUTからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数で二重に同期検波（ダブルロックイン検波）すれば、被測定光ファイバFUTの特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを効果的に分離できる。

【0074】

次に、本発明における第2の実施形態について説明する。図6は、第2実施形態による光ファイバ特性測定装置を示している。ここでは、データ処理器23に繋がる検出手段33として、被測定光ファイバFUTからの出射光パワーを測定する検出器20の他に、第1の基準信号発生器12によりポンプ光に施した強度変調周波数と、第2の基準信号発生器5によりプローブ光に施した強度変調周波数との差周波数成分を生成するビート周波数生成器41や、このビート周波数生成器41で得た差周波数成分によって、光検出器20からの検出出力を同期検波することにより、誘導ブリルアン現象に伴うプローブ光の増加分だけを分離して、後段のデータ処理器23に最終的なデータを出力するロックイン増幅器42を備えている。つまり、この第2実施形態では、ポンプ光に施した強度変調周波数とプローブ光に施した強度変調周波数との周波数差を利用して、単独のロックイン増幅器42により一度にプローブ光の増加分だけを取り出すことを特徴としており、このようなビート周波数による同期検波の手法を、特に「ビートロックイン」法と名付ける。なお、それ以外の構成については、第1の実施形態で示したものと共通している。

【0075】

そしてこの実施形態でも、光検出器20の前段に光波長フィルタを用いず、代わりにポンプ光とは異なる周波数で、プローブ光にも第1の光強度変調器13により強度変調を施す。これにより、反射や後方散乱を受けたポンプ光の一部が、被測定光ファイバFUTから出射されると共に、チョッピングされたプローブ光に重畳して、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の増加分が、ポンプ光の強度変調周波数によりチョッピングされた状態で、被測定光ファイバFUTから出射される。

【0076】

一方、ビート周波数生成器41は、ポンプ光に施した強度変調周波数とプローブ光に施した強度変調周波数との差周波数成分を生成し、これをロックイン増幅器42に出力する。ロックイン増幅器42は、この差周波数を利用して光検出器20からの検出出力を同期検波し、歪み測定に必要なプローブ光の増加分だけを一度に取り出す。こうして本実施形態でも、光波長フィルタを用いることなく、単独のロックイン増幅器42によって、プローブ光の増加分を他の成分から完全に分離することができる。しかも、装置として空間分解能 Δz を高く維持したまま測定範囲を拡大させることを目的として、光源1の周波数変調の振幅 f をある程度広げた場合でも、ポンプ光とプローブ光の周波数差 Δf を利用して、プローブ光の増加分を検出してはいないので、この振幅 f の影響を受けることなく、必要なプローブ光の増加分だけを正しく検出することができる。

【0077】

次に、図6における装置の実験例とその結果について説明する。図7に示す実験結果は前述の図4(a)に対応したもので、ここでは、通常の単一モード光ファイバ(SMFファイバ：ブリルアン周波数シフト量約10.8GHz)の一部に、短尺の分散シフト光ファイバ(DSFファイバ：ブリルアン周波数シフト量約10.5GHz)を融着した被測定光ファイバFUTのサンプル(ダブルロックイン法についての実験結果と同じもの)について、上段には、BOCDA法により単一モード光ファイバSMF部のブリルアンスペクトルを測定したものが示されており、また下段には、分散シフト光ファイバDSF部のブリルアンスペクトルを測定したものが示されている。

【 0 0 7 8 】

この実験結果から明らかなように、何れの部位においても、従来のシングルロックイン法に比べて、本実施形態におけるビートロックイン法の方が、測定位置に関するブリルアン周波数を示すピークがより鮮明に視認できる。特に、分散シフト光ファイバDSF部を測定した下段の図では、シングルロックイン法において分散シフト光ファイバDSF部に対応したピークと、その右側にある単一モード光ファイバSMF部に対応した丘の高さに違いが殆どなく、ピーク判別が困難になっていることが分かる。これに対して、同図において、ビートロックイン法による測定結果では、分散シフト光ファイバDSF部に対応したピークがはっきりと区別して分かり、ビートロックイン法の有用性が確かめられた。また、上段の図においても、ビートロックイン法の方がシングルロックイン法に比べて、単一モード光ファイバSMF部に対応したピーク周波数がより高精度に測定できることが分かる。

10

【 0 0 7 9 】

つまり、シングルロックイン法ではデータ（カーブ）の変化幅が狭く、その下に大きなバイアスが存在するのに対して、ビートロックイン法ではバイアスが小さく（無く）、データ（カーブ）の変化幅が大きくなっており、これがピークを精度良く測定できる理由となっている。このバイアスは、光増幅器（第1のEDFA14）で強くされたポンプ光が、測定光ファイバFUT中で反射されてきた成分により生じたものである。この反射は、測定光ファイバFUTの接続部分からのものばかりではなく、測定光ファイバFUT中で必ず生じる後方レーリー散乱によっても起こる消し難い反射と言える。ポンプ光に強度変調を施した場合、この反射成分も同様の強度変調を受けているので、従来のシングルロックイン法では除去することができない。本発明のダブルロックイン法やビートロックイン法によって、始めてこうした反射成分をも除去できるようになっている。このように、上記のバイアス成分の除去が可能であるという利点は、ビートロックイン法とダブルロックイン法に共通したものである。

20

【 0 0 8 0 】

さらに、第1実施形態におけるダブルロックイン法では、二つのロックイン検出のために周波数の大きく異なる2つの変調を施し、第2のロックイン増幅器22で検出する際に、比較的低い周波数で同期検波する必要があり、測定速度が第2の基準信号発生器5に依存して遅くなる。その点、本実施形態におけるビートロックイン法では、2つの変調周波数の差周波数で1度の同期検波を行えばよく、この際の同期検波周波数を高くできるので、測定速度を従来のシングルロックイン法と同程度に高く保つことができる、という利点がある。

30

【 0 0 8 1 】

以上のように本実施形態における光ファイバ特性測定装置は、特に変調手段として第1の実施形態と同様に、ポンプ光に強度変調を施す第1の強度変調器13と、ポンプ光とは異なる周波数でプローブ光に強度変調を施す第2の強度変調器6とを備えていると共に、検出手段33として、ここでは被測定光ファイバFUTからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波する同期検波部すなわちロックイン増幅器42を備えている。

【 0 0 8 2 】

またこれに対応して、本実施形態における光ファイバ特性測定方法は、ポンプ光に強度変調を施し、このポンプ光とは異なる周波数でプローブ光に強度変調を施すことで、プローブ光とポンプ光の双方に変調が施され、被測定光ファイバFUTからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波することで、誘導ブリルアン散乱によるプローブ光の変化分だけを分離することを特徴としている。

40

【 0 0 8 3 】

こうした装置や方法の場合、ポンプ光とプローブ光のそれぞれに異なる周波数で強度変調が施されているので、被測定光ファイバからの出射光を、ポンプ光への強度変調周波数とプローブ光への強度変調周波数との差周波数で同期検波すれば、被測定光ファイバFUT

50

の特性を測定する上で必要なプローブ光の変化分だけを効果的に分離できる。さらに、2つの変調周波数の差周波数で1度の同期検波を行なうので、同期検波の周波数を高く設定することができ、測定速度を高く維持できる。

【0084】

なお、本発明は、上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で変更可能である。例えば、発明の詳細な説明中にある周波数変調とは、位相変調の技術も含んでいる。また、光源として周波数変調された光を出力可能なものであれば、レーザー以外の手法による光を利用してもよい。さらに、各実施形態にある強度変調器6, 13や、ロックイン増幅器21, 22, 42は、同等の機能を有する強度変調部や同期検波部に置き換えてもよく、第2の実施形態におけるビート周波数の生成に際しては、例えば両光の強度変調周波数の和成分などを採用してもよい。

10

【産業上の利用可能性】

【0085】

本発明におけるBOCDA法は、従来に比べて空間分解能の限界を100倍改善し、また測定速度も1万倍改善して、世界的にも注目を集めており、高い空間分解能、高速測定、測定位置へのランダムアクセス機能を併せ持つ世界唯一の技術である。そのため、土木・建設、航空・宇宙、原子力・エネルギー、交通・運輸などの幅広い分野で、痛みのわかる材料・構造のための神経網として本技術が注目されている。本発明により、一層の性能向上が図られ、実用化が加速されるものと期待できる。

【図面の簡単な説明】

20

【0086】

【図1】本発明の第1実施形態における光ファイバ特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図2】同上、既存のシングルロックイン法と本実施形態の特徴であるダブルロックイン法との動作比較を示す概略図である。

【図3】同上、(a)は被測定光ファイバFUTの構造を示す図であり、(b)は、被測定光ファイバFUTの分散シフト光ファイバDSF部周辺で測定されたブリルアンピーク周波数の特性を示すグラフである。

【図4】同上、シングルロックイン法とダブルロックイン法の各場合における比較データであって、(a)は、単一モード光ファイバSMF部および分散シフト光ファイバDSF部に対応したブリルアンゲインスペクトルBGSのグラフである。また(b)は、分散シフト光ファイバDSF部周辺で測定されたブリルアンピーク周波数のグラフである。

30

【図5】同上、一般的な電気光学変調器EOMと本実施形態におけるSSB変調器を利用した場合における比較データであって、(a)はシングルロックイン法において、分散シフト光ファイバDSF部周辺で測定されたブリルアンゲインスペクトルBGSのグラフである。また(b)は、ダブルロックイン法において、分散シフト光ファイバDSF部周辺で測定されたブリルアンゲインスペクトルBGSのグラフである。

【図6】本発明の第2実施形態における光ファイバ特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図7】同上、シングルロックイン法とビートロックイン法の各場合における比較データであって、単一モード光ファイバSMF部および分散シフト光ファイバDSF部に対応したブリルアンゲインスペクトルBGSのグラフである。

40

【図8】従来例における光ファイバ特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図9】図8中の被測定光ファイバ内における相関ピークを模式的に示した図である。

【図10】周波数変調周波数を変化させた時の相関ピークが変化の様子を示した図である。

【図11】遅延時間の調整により、0次の相関ピークの位置を可変させる様子を示した図である。

【図12】従来例における別な光ファイバ特性測定装置の構成を示すブロック図である。

【図13】従来例における被測定光ファイバ内における相関ピークを模式的に示した図で

50

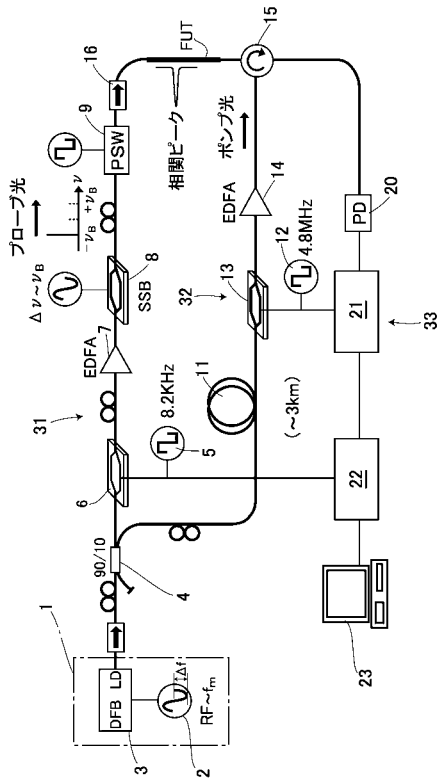
ある。

【符号の説明】

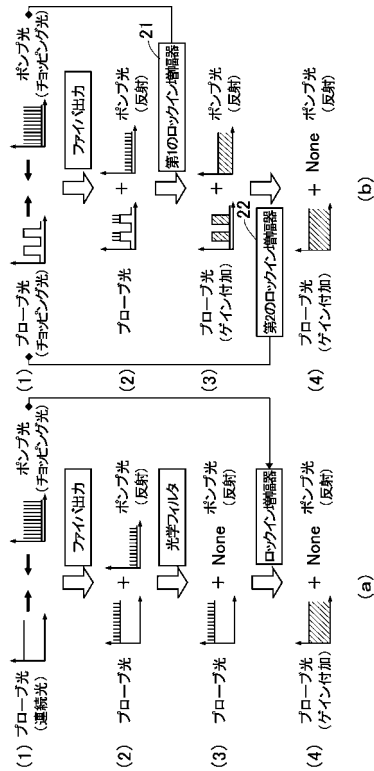
【 0 0 8 7 】

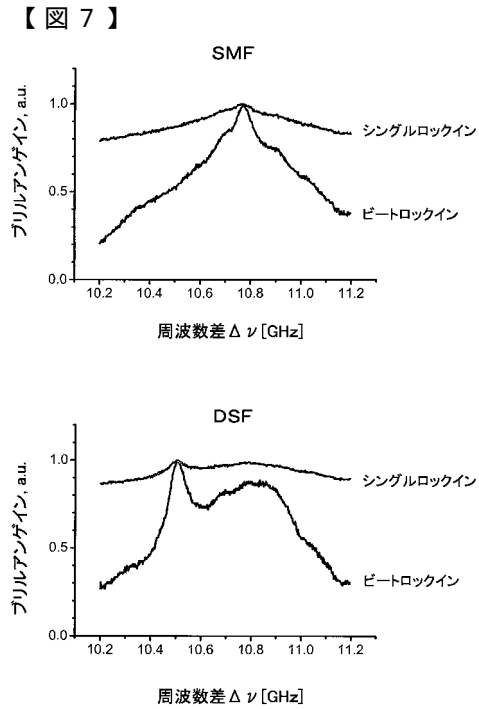
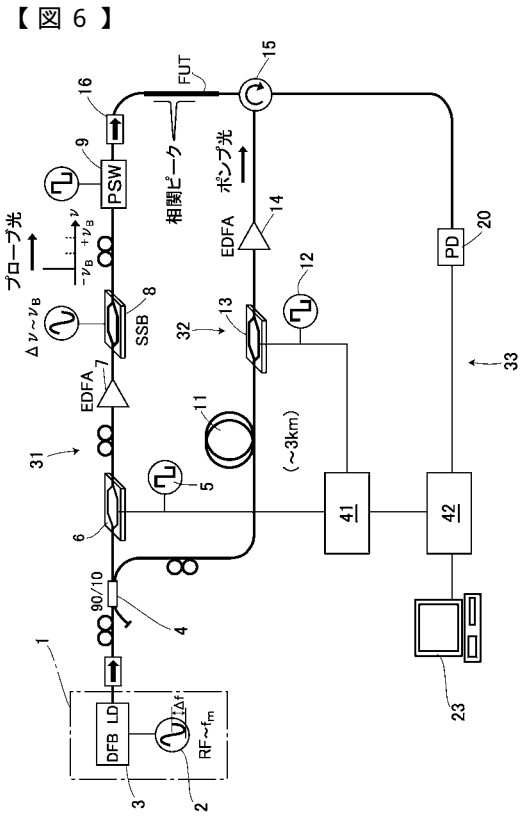
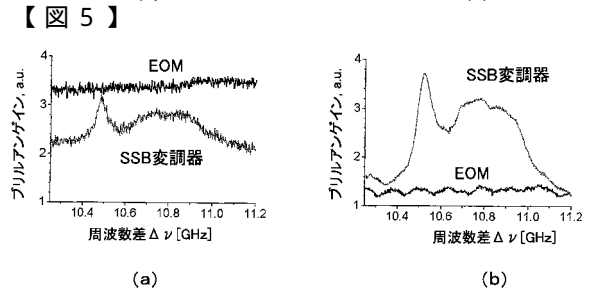
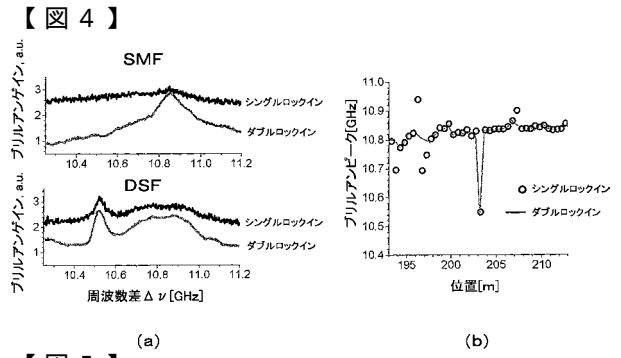
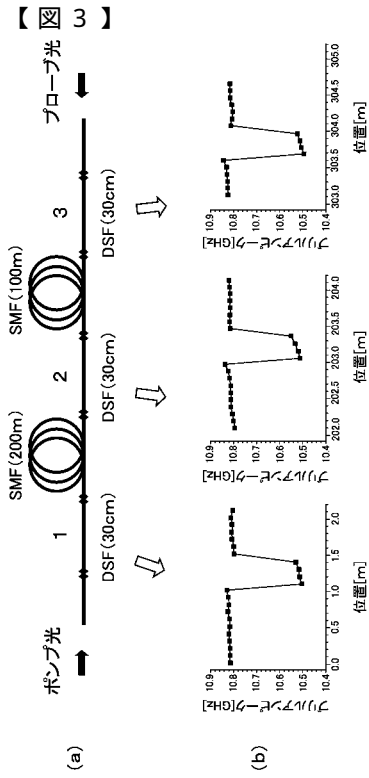
- 1 光源
- 6 第2の光強度変調器（変調手段，第2の強度変調部）
- 13 第1の光強度変調器（変調手段，第1の強度変調部）
- 21 第1のロックイン増幅器（第1の同期検波部）
- 22 第2のロックイン増幅器（第2の同期検波部）
- 23 データ処理器（測定手段）
- 31 プロープ光生成手段
- 32 ポンプ光生成手段
- 33 検出手段
- 42 ロックイン増幅器（同期検波部）
- FUT 被測定光ファイバ

【 図 1 】

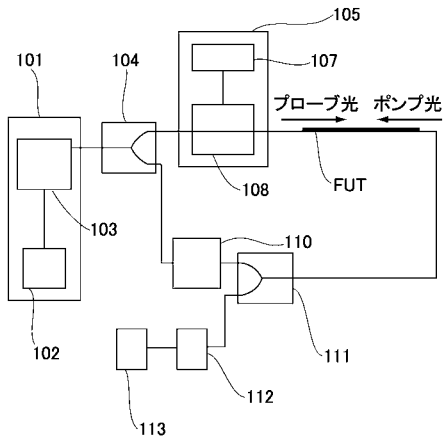


【 図 2 】

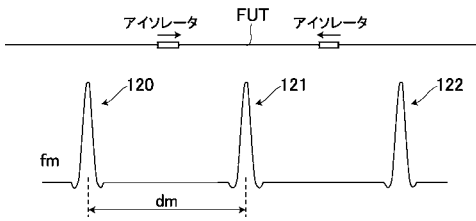




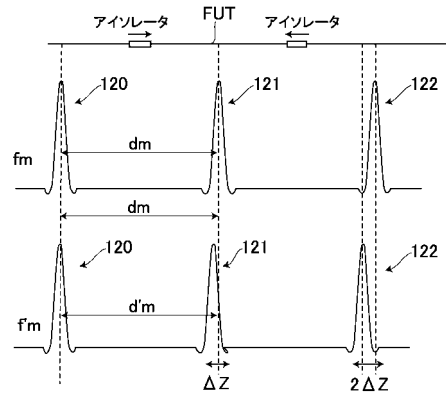
【図 8】



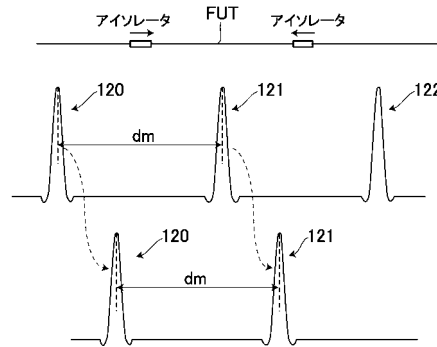
【図 9】



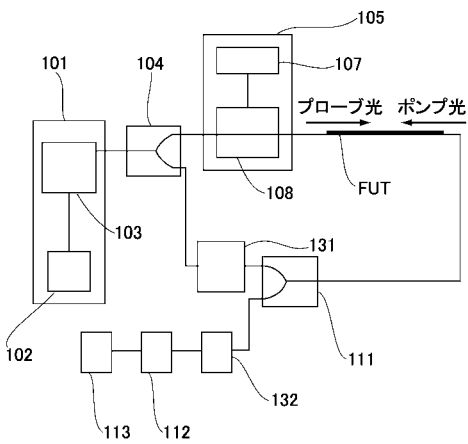
【図 10】



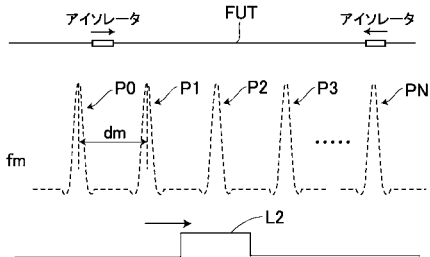
【図 11】



【図 12】



【図 13】



フロントページの続き

(74)代理人 100080089

弁理士 牛木 護

(72)発明者 保立 和夫

東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内

(72)発明者 宋 光容

東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内

審査官 樋口 宗彦

(56)参考文献 特許第3667132 (J P , B 2)

特許第3607930 (J P , B 2)

特開昭64 - 86032 (J P , A)

特開平9 - 105701 (J P , A)

特開平10 - 160625 (J P , A)

特開平2 - 6725 (J P , A)

特開平5 - 284110 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 0 1 M 1 1 / 0 0 - G 0 1 M 1 1 / 0 8

G 0 1 J 3 / 0 0 - 3 / 5 2 , 4 / 0 0 - 4 / 0 4 , 9 / 0 0 - 9 / 0 4

実用新案ファイル (P A T O L I S)

特許ファイル (P A T O L I S)

J S T 7 5 8 0 (J D r e a m 2)

J S T P l u s (J D r e a m 2)